100 kWh SMES モデルコイル—交流損失—

浜島高太郎, 花井 哲^{*1}, 和智 良裕^{*1}, 京藤 誠^{*1}, 嶋田 守^{*1},
 小野 通隆^{*1}, 島田 一人^{*1}, 櫛田 ルナ^{*1}, 手塚 勝^{*1},
 Nicolai MARTOVETSKY^{*2}, Jon ZBASNIK^{*2}, Jeffrey MOLLER^{*2}, 平野 直樹^{*3},
 篠田 公之^{*3}, 山本 政弘^{*4}, 高野 一郎^{*4}, 姫野 隆^{*4}, 佐藤 隆^{*5}

山口大学工学部 宇部市常盤台 2-16-1

^{*1} (株) 東芝 横浜市鶴見区末広町 2-4

^{*2} Lawrence Livermore National Laboratory, L-641, 7000 East Ave., Livermore, CA 94550, USA

^{*3} 中部電力(株)電力技術研究所 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1

^{*4} (財)国際超電導産業技術研究センター 東京都港区新橋 5-34-3

^{*5} 核融合科学研究所 土岐市下石町 322-6

(1999 年 3 月 16 日受理)

Test Results of the 100 kWh SMES Model Coil—AC Loss Performance—

Takataro HAMAJIMA, Satoshi HANAI,^{*1} Yoshihiro WACHI,^{*1} Makoto KYOTO,^{*1}
 Mamoru SHIMADA,^{*1} Michitaka ONO,^{*1} Kazuhiko SHIMADA,^{*1} Luna KUSHIDA,^{*1}
 Masaru TEZUKA,^{*1} Nicolai MARTOVETSKY,^{*2} Jon ZBASNIK,^{*2} Jeffrey MOLLER,^{*2}
 Naoki HIRANO,^{*3} Kimiyuki SHINODA,^{*3} Masahiro YAMAMOTO,^{*4} Ichiro TAKANO,^{*4}
 Takashi HIMENO^{*4} and Takashi SATOW^{*5}

Faculty of Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611

^{*1} Toshiba Corporation, 2-4 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045

^{*2} Lawrence Livermore National Laboratory, L-641, 7000 East Ave., Livermore, CA 94550, USA

^{*3} Chubu Electric Power Co., Inc., 20-1 Oodaka-cho, Midori-ku, Nagoya 459-8001

^{*4} International Superconductivity Technology Center, 5-34-3 Shinbashi, Minato-ku, Tokyo 105-0004

^{*5} National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi, Toki, Gifu 509-5292

(Received March 16, 1999)

Synopsis:

In order to establish a technology needed for a small-scale 100 kWh SMES device, a SMES model coil was fabricated. Performance tests were carried out at the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) in 1996. After that, the coil was installed in facilities of the Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) and tested in 1998, in collaboration between Japan and the United States. The AC loss results at LLNL were in good agreement with those at JAERI. It was reconfirmed from the results that the coupling loss of the coil consists of two components with short and long time constants. We found out from the signals of Hall probes that the current loops with long decay time constants were induced in the CIC conductor. These loops could enhance additional AC loss in the coil. To reduce the AC loss, we made small-sized CIC conductor of strands having a CuNi surface, a fabricated the small coil. The measured AC loss of the small coil was reduced to about 1/6. The CuNi surface on the strands was demonstrated to be effective to reduce AC loss in the coil.

Keywords: SMES, AC losses, cable-in-conduit conductors, forced flow

1. はじめに

超電導電力貯蔵装置 (SMES) は、超電導体の抵抗がゼロである特徴を利用して超電導コイルに電流を供給し、磁気エネルギーの形で電力を貯蔵して必要に応じてエネルギーの出し入れを行う装置である。電力の直接の入出力により高い貯蔵効率、速い応答速度が得られ、パワーエレクトロニクス素子と組み合わせると有効・無効電力の独立制御などが可能である。そのため、kWh から GWh 級の幅広い規模で、電力システムの負荷変動補償や系統安定度向上から負荷平準化までの多様な機能を持ち、将来の電力システムにおいて重要な役割を果たすものと期待される^{1,2)}。

通産省資源エネルギー庁は、日本における本格的な SMES 開発の第一歩として、小規模 SMES パイロットプラント (電力貯蔵容量 100 kWh 級、出力 20 MW) 建設に必要な要素技術の確立のためのプロジェクトを 1991 年より 8 年計画で開始した^{2~4)}。財団法人超電導産業技術研究センター (ISTEC) が本プロジェクトを受託し、これに学識経験者・電力会社・メーカーが参画して推進している。その一環として、開発要素の最も多い SMES モデルコイルを製作し、1996 年には日本原子力研究所 (原研) との共同研究で基本的な性能評価試験を実施した。その一連の試験結果はすでに報告した^{5~11)}。

その後、SMES モデルコイルは、日米の国際協力の下に、1997 年に米国ローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL) へ輸送され、LLNL の試験設備に組み込まれた。1998 年に繰返し通電、機械強度、交流損失特性などの性能評価試験が実施された。

本論文では、LLNL における SMES モデルコイルの一連の性能評価試験のうち、主に交流損失特性について述べる。原研で得られた交流損失結果はすでに報告しており、そこでは次の結論を得た¹¹⁾。SMES モデルコイルのヒステリシス損失は素線のその本数倍に一致した。結合損失は多くの時定数から構成され、それを 2 つの時定数で代表すると、220 ms 程度の短時定数と、30 s 程度の長時定数の成分で表すことができた。このうちの短時定数の成分は短尺導体の結合損失測定結果にほぼ一致した。一方、長時定数の成分はコイルにして初めて現れた損失で、約 4 m 程度の特性長を有する結合電流ループが導体内で発生するものと考えられた。

このような結合損失の長時定数成分は核融合科学研

究所の LHD 用ボロイダルコイルの交流損失試験でも観測された。そこでは、結合電流ループとして 124 s 程度の時定数と 11.5 m 程度の特性長を持つループが推定された^{12,13)}。

LLNL における交流損失試験では、原研で得られたこれらの諸特性を確認するために、通電電流波形を種々に変化させて交流損失を測定した。さらに、長時定数成分を直接観測するために、SMES モデルコイルにホール素子を取り付けて、ループ電流による磁界の減衰を測定した。

最後に、将来の SMES に用いる大型導体の有力な候補の 1 つとして、交流損失の低減を図った改良導体を提案した。その導体を製作して、短尺特性を調べた。併せて、同じ素線を用いた 1/4 縮小断面ケーブル導体で小型コイルを製作し、コイルとしての交流損失特性を測定し、改良導体の有効性を検討したので報告する。

2. SMES モデルコイルの交流損失試験

SMES モデルコイルの主要諸元を Table 1 に示す。装置に関する詳細な報告は参考文献⁹⁾に述べられているので、ここでは、LLNL での交流損失測定方法およびそれに必要な事項についてのみ述べる。SMES モデルコイルはケーブル・イン・コンジット (CIC)

Table 1 Main parameters of the SMES model coil.

Conductor	
Type	Cable-in-conduit
Conduit outer dimension	25.4×27.8 mm
Thickness	2.3 mm
Void fraction	36%
Strand material	NbTi/Cu/CuNi
Diameter	0.62 mm
Configuration	3×3×3×3×3×4=972
Coil	
Inner diameter	2.76 m
Outer diameter	3.34 m
Height	0.234 m
Turns	11×8=88
Inductance	39.6 mH
Operating current	20 kA
Stored energy	7.92 MJ
Maximum magnetic field	2.84 T at 20 kA

導体で巻線された4ダブルパンケーキで構成され、超臨界圧ヘリウム (SHe) 冷媒は、各ダブルパンケーキ内側の内径渡り部分から供給され、上下のパンケーキを並列に流れて、外周のパンケーキ間接続部から排出される。

LLNL での交流損失測定には原研の場合と同じエンタルピー法を用いた。すなわち、通電中の各パンケーキの入口・出口の SHe 温度、圧力、流量を測定し、入口・出口の SHe エンタルピーを求め、両者のエンタルピー差を時間積分して交流損失量を求めた。その際の時間積分は、SHe の状態が通電する前の状態になるまで十分に長い時間をとった。また、エンタルピー法で得られた交流損失量の補正は、冷媒配管の入口に巻き付けたヒータの入熱と比較して較正した。測定は数千秒の長い時間積分で行うため、その期間中に冷媒流量などが変動する。そのため、測定結果には ± 1 kJ 程度の誤差が伴うことを考慮する必要がある。

LLNL での交流損失測定結果のみを Table 2 に示す。表中のヒステリシス損失は原研での試験結果を使

用した。また、結合損失は全損失からヒステリシス損失を除いた分とした。

全交流損失と最大磁界変化率の関係を Fig. 1 に示す。図中の黒塗りの測定点は原研での測定データを表す¹¹⁾。図から、LLNL 測定結果は、原研での測定値、およびその磁界変化率に対して飽和する特性が比較的良く一致している。同じ磁界変化率での交流損失の差は、台形波電流波形のフラットトップ時間の長さの違いによるものである。

また、本コイル試験は、本格的な大型超電導マグネットを用いて日米で同じ計測を行った数少ないケースである。温度・流量などの冷媒の条件や、計測装置が異なったにもかかわらず、同じ測定原理で同じコイルの交流損失を測定して、ほぼ同じ値が得られたことは、本エンタルピー法の国際的な標準化が可能なことを示唆している。

3. SMES モデルコイルの結合損失

結合損失 Q_c は、磁界の立ち上げ時間の関数である

Table 2 AC loss data at LLNL.

Test number	Flat top current (kA)	Ramp rate (A/s)	Flat top time (s)	AC loss Q_{ac} (kJ)	Hysteresis loss Q_h (kJ)	Coupling loss Q_c (kJ)
prc 01113	5.26	199	0*	1.86	0.53	1.33
prc 01114	5.24	201	40	3.23	0.52	2.71
prc 01275	9.94	187	0	6.40	0.99	5.41
prc 01165	9.60	188	300	8.73	0.96	7.77
prc 01287	19.69	23.3	300	9.41	1.97	7.44
prc 01172	19.75	47.3	0	8.90	1.98	6.92
prc 01175	19.74	47.3	100	8.20	1.97	6.23
prc 01168	19.75	188	0	20.4	1.98	18.4
prc 01169	19.75	188	30	19.4	1.98	17.4
prc 01166	19.76	188	300	26.9	1.98	24.9
prc 01170	19.81	473	0	36.3	1.98	34.3
prc 01171	19.74	472	100	36.9	1.97	34.9
prc 01178	19.99	944	0	45.0	2.00	43.0
prc 01179	19.94	950	30	51.6	1.99	49.6
prc 01273	19.66	950	100	50.2	1.97	48.2
prc 01191	24.48	189	300	29.5	2.45	27.1
prc 01193	29.35	47.3	300	15.5	2.94	12.6
prc 01277	29.46	189	0	39.0	2.95	36.1
prc 01279	29.44	188	300	40.1	2.94	37.2
prc 01278	34.33	47.2	0	23.2	3.43	19.8

* Flat top time 0 means triangle waveform.

Fig. 1 AC losses in the SMES model coil as a function of ramp rate with parameter of flat top currents.

Fig. 2 Normalized coupling loss as a function of inverse charging time. The loss consists of two major time constants; $Q^* = Q_1 + Q_2 \times 0.06$. The time constant of Q_1 is about 0.22 s, and that of Q_2 about 30 s.

規格化損失 Q^* を用いて、次式で表すことができる¹⁴⁾。

$$Q_c = Q^* \left(\frac{2}{\mu_0} \sum_i B_{mi}^2 V_i \right) \quad (1)$$

ここで、 Q^* は単発台形波の場合次式で与えられる。

$$Q^* = \zeta \{ 2 + \zeta (1 - e^{-1/\xi}) (e^{-1/\xi - 1/\xi} - e^{-1/\xi} - 2) \} \quad (2)$$

ただし、 $\zeta = \tau_c/t_1$, $\xi = \tau_c/t_2$, $\tau_c = \frac{1}{2} \frac{\mu_0}{\rho_{\perp}} \left(\frac{L_p}{2\pi} \right)^2$, B_{mi} ,

V_i は i 番目の要素における最大磁界と体積を表し、体積要素は素線の体積を用いる。また、 t_1 は立ち上げ時間、 t_2 はフラットトップの時間、 L_p はツイストピッチを表す。

Fig. 3 Normalized AC loss as a function of flat top time in the case of a 1 kA/s ramp rate.

規格化損失 Q^* を磁界の立ち上げ時間の逆数（周波数）に対してプロットした結果を Fig. 2 に示す。あわせて、原研の試験結果を黒塗りの測定点として示す¹¹⁾。図から、規格化した交流損失はほぼ 1 つの曲線上にある。すなわち、結合損失がほぼ立ち上げ時間の関数であることを意味している。この曲線（実線）を 2 つの結合損失の時定数に分解すると、約 0.22 s（一点鎖線）と約 30 s（二点鎖線）の時定数の成分で近似できる。LLNL の試験結果は原研の試験結果を補完しており、両者ともに同じ傾向を示す。

損失曲線をさらに詳細にみると、規格化損失は同じ立ち上げ時間でもわずかに曲線からずれる。これは、交流損失の値が台形波のフラットトップ時間に依存しているためである。この関係をみるために、式(2)を用いて立ち上げ時間 20 s の場合の規格化損失とフラットトップ時間の関係を計算した結果を Fig. 3 に示す。フラットトップ時間が長時定数の時間以上に長くなると、交流損失も増加することが分かる。この傾向は Table 2 の結合損失値からも測定誤差を考慮すれば確認できる。

これらの事実から、SMES モデルコイルの結合損失は少なくとも 2 つ以上の時定数の成分から成り立っていることが確認できる。このうち、0.22 s の短時定数の成分は、実導体の短尺試料の結合損失結果と一致する¹¹⁾。他方、長時定数の成分は、コイルにすることにより初めて現れるもので、平均的に 4 m 程度の結合電流のループから発生しているものと推測された¹¹⁾。このため、LLNL 試験においては、コイルにホール素子を取り付けて結合損失電流ループの磁界測定を行うことにより、長時定数成分の検証を試みた。

4. SMES モデルコイルの結合電流ループ

結合電流ループは素線間で構成されると仮定すると、本コイル導体の場合、素線が撚られているため、電流ループにより発生する磁界方向は撚りの効果により種々の方向を持つことになる。ループが発生する磁界を測定するホール素子は、Fig. 4 に示すように、強大な主磁界の影響を受けないように主磁界に平行に配置して、ループ電流による微弱な磁界を測定した。位置はコイル上面と内径面の2カ所であり、それぞれ3個のホール素子を配列した。

コイル上面に配列したホール素子の出力波形とコイル通電電流波形の1例を代表的な波形としてFig. 5 に示す。ホール素子は数100 G 程度の主磁界の影響を受けている。図から、電流がフラットトップの領域に入ると、結合電流ループによる磁界の減衰を観測し、また、電流が完全にゼロになった後でも同じループによる磁界の減衰を観測した。ループの磁界減衰波形から、最初に3.8 s 程度の時定数を持つループの磁界が減衰し、続いて100 s 程度の時定数を持つループの磁界(3.8 s の場合とは方向が逆)が減衰していることが分かる。また、同じホール素子の出力波形は励磁速度が500 A/s までほぼ同じ時定数を示した。したがって、何らかの原因で形成されたループには、主磁界をシールドするように循環する結合電流が誘起される。これらのループに流れる結合電流が長時定数の交流損

失を引き起こしている主要因と考えられる。

他のホール素子の出力からも、長時定数が2つ程度の成分から成り立っていることが観測された。短い方は約4 s 程度であり、長い方は50~110 s で平均的に約80 s 程度の長時定数成分が観測された。これらは2カ所のホール素子の位置で測定した結果であり、実際には非常に多くのループがコイル内で構成されていることが予想される。

これらのループの特性長 L_2 は、等価抵抗が短時定数と同じであると仮定すると、下式で与えられる。

$$L_2 = L_1 \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}} \quad (4)$$

ただし、 L_1 は最終撚りピッチ、 τ は時定数で、添え字1 は短時定数、2 は長時定数を表す。代表的な4 s と80 s の長時定数に対する特性長としては、

$$\tau_2 = 4 \text{ s} : L_2 = 1.5 \text{ m}$$

$$\tau_2 = 80 \text{ s} : L_2 = 6.9 \text{ m}$$

程度が得られる。また、これらの値を平均した特性長は4 m 程度となり、時定数30 s の場合の値とほぼ一致する。

一方、このようなループに流れる電流は、いわゆる Ramp Rate Limitation (RRL) を引き起こす偏流と同じ性質のものであると考えられる^{15,16)}。本コイルで RRL 特性に起因するクエンチが観測されなかったのは、励磁速度が RRL を誘起するほど速くない、および本コイルの安定性が非常に高いことによると考えられる。また、加速器で観測された長時定数を有する Supercurrents、あるいは Boundary-induced coupling currents も同じ原因と考えられる¹⁷⁾。

Fig. 4 Locations of Hall probes detecting small field caused by coupling currents of long time constants.

Fig. 5 Magnetic field detected by Hall probe and coil current waveform.

このような長時定数のループが形成される原因は種々検討され、加速器用導体では相当に明白になってきたが¹⁷⁾、CIC 導体では導体構成の複雑さのため多くの可能性が示唆されている段階で^{15,18)}、まだ、決定的な結論に達してはいない。

5. 改良導体

SMES モデルコイルでは、コイル形状になって初めて現れる長時定数に起因する交流損失のために、短尺試験結果から予想した交流損失より大きな値となった。この長時定数の結合損失成分は、何らかの原因で素線間に形成されたループに発生する結合電流が素線間を渡るときに引き起こす結合損失であると推定される。したがって、素線間の接触抵抗を高くすることにより、長時定数に起因する損失の低減が期待できる。

素線間の接触抵抗を高くする代表的な方法として、素線の表面に CuNi などの高抵抗層を被覆する方法^{19,20)}、または、コンジット内のボイド率を大きくして素線間の接触を少なくする方法などが考えられる²¹⁾。改良導体には、確実に接触抵抗を高くできる CuNi 高抵抗層被覆素線を選んだ。

改良導体の主要諸元は、Table 3 に示すように、SMES モデルコイルに対して素線の構成・銅比などが若干異なるが、幾何学的寸法はできるだけ等しくした。この素線で SMES モデルコイル用導体の 1/4 の断面に相当する 5 次撚り線のケーブルを製作し、それをステンレス鋼のコンジットに挿入して改良導体を構成した。撚りピッチは SMES モデルコイルと同じにした。

この改良導体を用いて直径 340 mm、ターン数 18、全導体長約 20 m の小コイルを製作した。コイルは浸漬冷却型バックアップコイルのボア内に設けた真空中間内に設置して、交流損失を測定した。計測方法はエンタルピー法で、抵抗ヒータの入力と比較して較正した。試験は、バックアップコイルを励磁した後ホールドし、その後に電流遮断で小コイルに磁界変化を与え

て測定した。磁界の変化速度は保護抵抗の値と電流値を変えて行った。

また、小コイルでも、LLNL で試験した場合と同様に、長時定数成分を計測するためのホール素子を取り付けた。しかし、試験では最も早い 30 s の遮断時定数より長い時定数の磁界減衰波形を観測することができなかった。すなわち、CuNi 被覆をした改良導体では、少なくとも 5 次撚り線構成では長時定数の成分は少ないと推定される。

このことから、SMES コイルで観測されたような 4 m 程度の長い結合電流のループは少なく、結合損失は最終撚りピッチ長の 2 乗に比例する成分が主成分と考えられる。したがって、小コイルの結合損失結果を SMES 導体と比較するために、最終撚りピッチ長の換算をすると、結合損失は約 35~60 ms になる。この値は、別に製作した 6 次撚り線構成の改良導体の短尺試料による結合損失測定結果の約 17 ms と比較して若干大きくなっている。この原因として、小コイルのボイド率が 36.0% で短尺試料の 37.0% より少なくなったため、素線間の接触抵抗が減少したことが主要因と考えられる²¹⁾。

最終の 6 次撚り線構成でも長時定数の成分が少ないと仮定し、規格化損失 Q^* と立ち上げ時間の逆数との関係を求めた結果を、Fig. 6 に白抜き四角形で示す。図中には、SMES モデルコイルの試験結果も併せて掲載した。図から、SMES モデルコイルの短時定数 0.22 s と比較して、約 1/4 に低減されているのが分かる。また、長時定数の成分がないため、結合損失は立ち上げ時間の逆数が 0.1 Hz の位置で約 1/6、0.01 Hz で約 1/20 に低減されているのが分かる。こ

Table 3 Main parameters of the improved CIC conductor.

Strand diameter	0.62 mm
Twist pitch	6.2 mm
Coated material	CuNi (34 μ m)
Cu/CuNi/NbTi ratio	4.7/2.5/1
Cable configuration	3 $\times$ 3 $\times$ 3 $\times$ 3 $\times$ 3=243

Fig. 6 Normalized coupling loss of the improved CIC conductor as a function of $1/t_i$.

のことから, CuNi 被覆の効果により接触抵抗が増加し, 交流損失を低減できることが確認できた。

一方, 超電導コイルを安定に運転するためには十分な安定性が要求され, 一般的には, 安定性は交流損失低減とトーレードオフの関係にある。ここでは, 導体の安定性を調べるために, ケーブルの素線間インピーダンスの周波数特性を測定して検討した²²⁾。1 kHz における改良導体のインピーダンスは約 0.1 mΩ であり, 安定に運転できたクロム被覆素線の導体のインピーダンス約 1 mΩ と比べて約 1 桁ほど低かった。したがって, 改良導体は交流損失が低減され, かつ安定に運転可能であると予想される。

6. ま と め

SMES モデルコイルの原研および LLNL での一連の交流損失試験結果から, 次のことが分かった。

1) LLNL での測定結果は交流損失値, およびその特性ともに原研で得た結果と一致した。これにより, 原研での試験結果の妥当性を実証した。

2) SMES モデルコイルの結合損失は, 規格化損失の周波数依存性から, 短時定数と長時定数成分とで構成されることを再確認した。

3) 長時定数の存在は, 台形波通電波形のフラットトップ時間を変えることにより, 結合損失が変化することからも確認できた。

4) 長時定数の存在の決定的な証拠は, ホール素子を用いて導体内の結合電流ループが発生する微弱磁界を観測できたことで示される。また, 磁界減衰波形から, これらのループは種々の時定数を持つループから構成されていることも分かった。

交流損失低減のために, CuNi 被覆素線を用いた縮小改良導体で小コイルを製作し, 交流損失を測定した結果, 次のことが分かった。

1) 立ち上げ時間が 10 s 程度の場合, 損失を約 1/6 程度まで低減できた。これにより, CuNi 被覆導体は確実に結合損失を低減できることが確認できた。

2) 小コイルでは結合損失の長時定数は観測されなかった。

以上のことから, 今後の課題として次のことが挙げられる。

1) 長時定数の結合損失ループが存在することが実証できたので, 今後はそのループが形成される原因を研究する必要がある。

2) 長時定数のループは, いわゆる CIC 導体に発生

する RRL 現象や, 加速器で観測される Supercurrents と同じ現象であると推測され, それらを統一的に説明することが重要な課題である。

3) 高抵抗層 CuNi 被覆素線は交流損失低減に有効であることが分かり, かつ安定性も素線間のインピーダンス測定結果から十分に満足されていることが示されたので, 今後, 実規模サイズで確実に長時定数の交流損失が低減されていることとあわせて安定性も確保されていることを示す必要がある。

おわりに, 本試験に携わり, ご尽力いただいた多くの方々に感謝の意を表します。また, LLNL での試験遂行に当たり K. Thomassen 博士のご尽力に感謝します。

参 考 文 献

- 1) C.A. Luongo : IEEE Trans. Magn. **32** (1996) 2214
- 2) E. Masada, et al. : Proc. IEA-Symposium on the Use of Superconductivity in Energy Storage, Karlsruhe Germany (1994) 97
- 3) 山本政弘ら : 低温工学 **33** (1998) 454
- 4) Y. Murakami, et al. : Proc. ICEC-16/IMC (1997) 1041
- 5) T. Satow, et al. : The International Conference on Electrical Engineering '97 (1997) 122
- 6) 花井 哲ら : 低温工学 **33** (1998) 460
- 7) 濱田一弥ら : 低温工学 **33** (1998) 467
- 8) 磯野高明ら : 低温工学 **33** (1998) 473
- 9) 和智良裕ら : 低温工学 **33** (1998) 479
- 10) 伊藤智庸ら : 低温工学 **33** (1998) 485
- 11) 浜島高太郎ら : 低温工学 **33** (1998) 492
- 12) T. Mito, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 330
- 13) T. Mito, et al. : Cryogenics **38** (1998) 551
- 14) 船木和夫, 住吉文夫 : 多芯線と導体, 産業図書, 東京 (1995) 35
- 15) S. Jeong, et al. : Cryogenics **36** (1996) 623
- 16) M. Takayasu, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 150
- 17) A. Verweij, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 723
- 18) N. Koizumi, et al. : Cryogenics **37** (1997) 441
- 19) H. Tsuji, et al. : 9th Symp. Engineering Problems of Fusion Research (1981) 2035
- 20) D. Richter, et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 786
- 21) A. Nijhuis, et al. : IEEE Trans. Magn. **32** (1996) 2743
- 22) 小野通隆ら : 低温工学 **31** (1996) 518